

Océans et cryosphère

Le rapport spécial sur l'Océan et la cryosphère dans le contexte des changements climatiques a été adopté par l'assemblée plénière du GIEC le 25 septembre 2019 à Monaco.

Dans cette Lettre, nous présentons d'abord un aperçu des principaux éléments de l'évaluation du GIEC, sous une forme accessible et illustrée d'éléments concrets.

Ensuite, trois scientifiques belges nous font bénéficier de leur expertise en présentant chacun un sujet important lié au rapport - la fonte des glaces du Groenland et de l'Antarctique, leurs mécanismes et leur impact sur le niveau des mers, et la perte d'oxygène des océans, perturbation anthropique moins souvent abordée mais à laquelle les changements climatiques contribuent également.

Nous vous souhaitons une agréable lecture de cette Lettre !

Philippe Marbaix, Bruna Gaino et Jean-Pascal van Ypersele

Sommaire

Aperçu du rapport du GIEC sur l'océan et la cryosphère.....	2
Groenland : quand les vents s'en mêlent	6
L'Océan est à bout de souffle	8
Les glaciers, d'un siècle à l'autre	10
Niveau des mers : toujours plus haut	11
Agenda et autres informations	15



Wallonie
environnement



Awac

▶ Aperçu du rapport spécial du GIEC sur l'Océan et la cryosphère

Rédaction : Philippe Marbaix

Le titre complet de ce rapport, publié en septembre 2019, est « L'Océan et la cryosphère dans le contexte des changements climatiques » (en anglais : Ocean and cryosphere in a changing climate) [1]. C'est le dernier d'une série de trois rapports spéciaux thématiques (les précédents rapports se rapportent à un réchauffement de 1.5°C [Lettre N°11] et aux « terres » [Lettre N°14]). Les activités du GIEC se concentrent maintenant sur le 6^e rapport d'évaluation, qui vise à couvrir l'ensemble des aspects des changements climatiques et doit être publié en 2021 et 2022.

Quels sont les principaux éléments que le GIEC a jugés importants en ce qui concerne les conséquences des changements climatiques pour l'océan, la cryosphère, les activités humaines qui en dépendent et les systèmes naturels ? Dans les prochaines pages, nous tentons d'y répondre à l'aide d'un bref aperçu du rapport. Notre objectif est d'en faciliter la lecture, notamment par une sélection d'exemples plus concrets que ceux qui figurent dans les « messages clés » du texte original, et en évitant davantage l'usage de jargon.

Cet article se présente en 4 parties :

- Les changements physiques relatifs à l'océan et à la cryosphère [avec une page de graphiques montrant leur évolution moyenne],
- Leurs conséquences sur les écosystèmes,
- Leurs conséquences pour les populations et les services écosystémiques
- Les possibilités de réactions humaines à ces changements

En bref :

- Des niveaux de mer extrêmes, qui survenaient une fois par siècle dans le passé récent, pourraient survenir une fois par an en de nombreux endroits vers 2050. Dans un scénario où les émissions continuent d'augmenter fortement, il y a un risque significatif que le niveau des mers augmente de plus d'1 m au cours du siècle. Dans tous les scénarios, la hausse continue après 2100.
- Le réchauffement, l'acidification, et la diminution du niveau d'oxygène des océans ont déjà eu des impacts sur les espèces marines. Les projections pour le futur montrent notamment une modification de la répartition des poissons et une diminution de leur abondance, avec un impact négatif sur la pêche.
- La fonte des glaces continentales, la fonte des sols gelés, et la diminution de la couverture de glace de mer dans l'Arctique vont se poursuivre au moins jusqu'en 2050, et ensuite de façon plus ou moins forte selon les émissions de gaz à effet de serre.
- Ces pertes de glace vont modifier la structure et le fonctionnement des écosystèmes des régions polaires et de haute montagne, avec des pertes de biodiversité unique. La fonte des glaciers affectera négativement l'agriculture irriguée et l'hydroélectricité, et modifiera avalanches, inondations, et glissements de terrain.
- L'adaptation des écosystèmes sera plus difficile, et plus proche de ses limites, si le changement est plus rapide. Les communautés côtières sont (et seront) confrontées à des choix souvent difficiles en matière d'adaptation.

[1] Le rapport officiel et son résumé sont disponibles sur ipcc.ch/srocc.

En date de finalisation de cette Lettre, le site du GIEC fournit la version du rapport qui a été adoptée mais est encore soumise à corrections éditoriales. Les éléments présentés ici le sont sur la base de notre interprétation et notre traduction (non-officielle) du texte anglais.

En attendant une traduction officielle en français, des bénévoles ont déjà réalisé une traduction informelle du rapport : fr.wikisource.org/wiki/Rapport_spécial_du_GIEC_sur_l'océan_et_la_cryosphère_dans_le_contexte_du_changement_climatique

Niveau de confiance

Pour établir un niveau de confiance, le GIEC se base sur la quantité et la qualité de preuves indépendantes disponibles (données, théories, modèles, ...) et sur le plus ou moins grand accord entre experts. Dans la suite de ce texte, le niveau de confiance est indiqué au minimum lorsque la confiance est faible pour l'un des éléments évalués. Lorsque le niveau de confiance n'est pas indiqué, cela signifie que ce niveau est moyen ou élevé.

Pour plus d'information, voir Mastrandrea et al, IPCC 2010: [wg1.ipcc.ch/AR6/documents/AR5_Uncertainty_Guidance_Note.pdf](https://www.ipcc.ch/AR6/documents/AR5_Uncertainty_Guidance_Note.pdf), ainsi que Mastrandrea et al., Climatic Change, DOI: 10/d38w3c

Changements physiques

Les **surfaces couvertes de glace** (la cryosphère) ont diminué de manière généralisée suite au réchauffement. Le retrait des glaciers de montagne et la fonte du pergélisol (les sols qui étaient gelés en permanence) causent une perte de stabilité des pentes en haute montagne. Dans l'Arctique, la surface de glace de mer au mois de septembre diminue d'environ 13% par décennie.

En absorbant plus de CO₂, la surface des océans a subi une **acidification** croissante. De plus, la **concentration en oxygène** a diminué entre la surface et 1000 m de profondeur.

Depuis 1993, le **taux de réchauffement des océans** a probablement plus que doublé. Les océans absorbent et stockent 90% de la chaleur ajoutée au système climatique par le réchauffement global.

La **hausse du niveau moyen des mers** à l'échelle mondiale s'est accélérée au cours des dernières décennies en raison des taux croissants de perte de glace des calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique, ainsi que de la poursuite de la perte de masse des glaciers de montagne et de l'expansion thermique des océans. Pour certains **cyclones tropicaux**, les changements d'origine anthropique ont augmenté les niveaux d'eau de mer extrêmes (confiance élevée), les précipitations (confiance moyenne) et les vents (confiance faible) qui y sont associés.

[1] Le phénomène El Niño est caractérisé par un réchauffement des eaux d'une partie de l'océan Pacifique tropical. Ce phénomène est associé à un ensemble de changements océaniques et atmosphériques couplés entre eux et qui fluctuent sur plusieurs années (oscillation australe). Il en résulte un impact négatif sur la pêche notamment en Amérique du Sud, mais aussi des perturbations climatiques dans beaucoup d'autres régions, avec une réduction ou un accroissement des pluies. La Niña désigne la phase du phénomène où les eaux sont plus froides que la moyenne (voir notamment le chapitre 6 du rapport spécial).

La **perte de masse des glaciers** à l'échelle mondiale, le dégel du **pergélisol** et la diminution de la **couverture de neige** et de l'étendue de la **glace de mer** arctique devraient se **poursuivre à court terme (2031-2050)** en raison de la hausse de la température de l'air en surface, avec des conséquences inévitables sur le ruissellement et les risques locaux. De fortes réductions des émissions de gaz à effet de serre au cours des prochaines décennies réduiraient les changements supplémentaires après 2050 ; à l'inverse, dans un scénario à fortes émissions, le rythme des changements augmenterait.

Au cours du **21^e siècle**, on prévoit que l'**océan** atteindra des **conditions sans précédent**, avec notamment une augmentation des températures, une acidification accrue et une poursuite de la baisse de concentration en oxygène. Les phénomènes El Niño et La Niña extrêmes devraient devenir plus fréquents [1]. La circulation méridionale de l'Atlantique (un ensemble de courants marins qui transporte notamment des eaux chaudes vers le nord) devrait s'affaiblir, or toute réduction substantielle de ces courants a diverses conséquences négatives dont une diminution de la productivité marine, une augmentation du nombre de tempêtes en Europe, et une diminution des pluies dans le Sahel en été.

Des **niveaux d'eaux de mer** définis comme **extrêmes** parce qu'ils étaient historiquement rares (une fois par siècle dans un passé récent) devraient devenir fréquents (au moins une fois par an) en de nombreux endroits d'ici 2050. L'élévation du niveau des mers **se poursuit au delà de 2100** dans tous les scénarios étudiés. Pour un scénario dans lequel les émissions de gaz à effet de serre continuent d'augmenter fortement (RCP8.5), les projections d'élévation du niveau mondial des mers d'ici 2100 sont supérieures à celles du 5^e rapport d'évaluation du GIEC (2013) en raison d'une contribution plus importante de la calotte de glace antarctique par rapport à ce qui avait été estimé précédemment. Dans ce scénario, il y a un risque significatif que la hausse dépasse 1 mètre au cours du siècle.

Dans les siècles à venir, l'élévation du niveau de la mer devrait, selon le scénario dans lequel les émissions sont les plus élevées, atteindre plusieurs mètres d'ici 2300. Dans le scénario où les émissions sont les plus faibles parmi ceux qui ont été étudiés (RCP2.6), la hausse devrait être limitée à environ 1 mètre en 2300 (confiance faible).

Impacts sur les écosystèmes

Les **modifications de la cryosphère** (dans les régions montagneuses et les régions polaires) et les changements hydrologiques qui y sont liés ont contribué à changer les activités saisonnières, **l'abondance et la répartition des espèces végétales et animales** d'importance écologique, culturelle et économique, et ont perturbé le fonctionnement des écosystèmes. Par exemple, les espèces de basse altitude migrent vers le haut, et l'abondance de certaines espèces adaptées au froid ou dépendantes de la neige a diminué, augmentant leur risque d'extinction, notamment au sommet des montagnes.

Depuis 1950 environ, de nombreuses **espèces marines** de divers groupes ont vu leur aire de répartition géographique et leurs activités saisonnières se déplacer en réaction au réchauffement des océans, aux changements de la glace de mer et aux changements biogéochimiques, dont la diminution de quantité d'oxygène. Cela a entraîné partout des **changements dans la présence d'espèces et dans les interactions entre les espèces**, ce qui a eu des répercussions en cascade sur la structure et le fonctionnement des écosystèmes concernés. Dans certains écosystèmes, la pêche a également affecté les espèces.

Les changements liés à la **cryosphère** dans les régions polaires et de haute montagne vont occasionner des **modifications majeures** de la répartition des espèces, qui changeront la structure et le fonctionnement des écosystèmes et entraîneront finalement des **pertes** dans une **biodiversité** unique au monde (confiance moyenne). On prévoit une forte augmentation des feux de forêt, notamment dans les régions de toundra [steppes de la zone arctique].

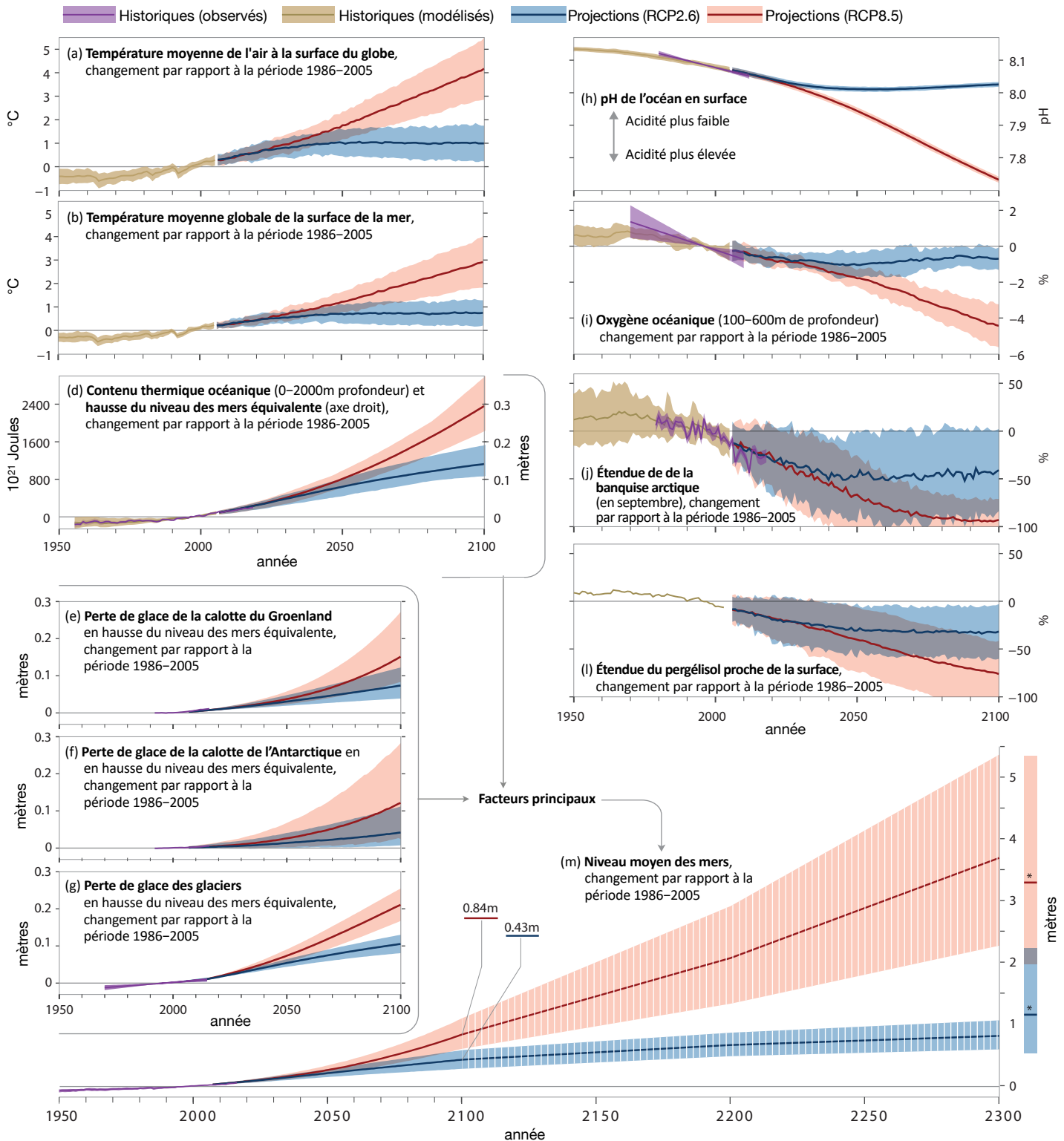
Les projections indiquent une **diminution de la biomasse d'animaux marins** mondiale et du potentiel de **pêche**, avec une modification de la répartition des espèces, selon tous les scénarios d'émissions. Le taux et l'ampleur de ce déclin devraient être plus élevés sous les tropiques. En plus du réchauffement, l'acidification, la perte d'oxygène, la diminution de l'étendue de glace de mer et certaines activités humaines affectent diverses espèces marines incluant des mammifères, oiseaux et poissons.

La **capacité des organismes et des écosystèmes à s'ajuster et à s'adapter** est plus élevée dans les scénarios à faibles émissions de gaz à effet de serre. Parmi les écosystèmes les plus sensibles, on cite bien sûr les coraux d'eaux chaudes, qui sont déjà affectés actuellement et sont soumis à des risques très élevés dès un réchauffement moyen de 1.5°C par rapport au niveau pré-industriel. D'autres espèces seront soumises à un risque d'impacts négatifs élevés si le réchauffement atteint 2°C, comme par exemple les herbiers marins (des plantes présentes dans les eaux peu profondes de toutes les parties du globe, importantes pour la biodiversité; voir par exemple ocean.si.edu/ocean-life/plants-algae/seagrass-and-seagrass-beds).

Océan et cryosphère : les changements moyens en graphique

La figure ci-dessous indique l'évolution de la moyenne d'une série de grandeurs physiques qui concernent l'océan et/ou la cryosphère, selon les observations historiques et des résultats de modèles (les couleurs sont expliquées au dessus de la figure). Deux scénarios pour le futur sont présentés : un scénario où les émissions de gaz à effet de serre sont faibles (RCP2.6) et un scénario où elles continuent d'augmenter fortement pendant presque l'entièreté du 21^e siècle (RCP 8.5) ; pour plus d'information, voir Lettre n°13, page 5.

Les bandes colorées représentent l'incertitude (pour les panneaux a, e, f, g et m, on estime qu'il y a au moins 66% de chances que la valeur réelle soit dans cette gamme, pour les panneaux b, d, h, i, j et l on estime qu'il y a 90% de chances). Sur le panneau relatif aux changements du niveau des mers (en bas, panneau m, total des contributions illustrées par les panneaux d à g), la zone hachurée indique que le niveau de confiance attribué aux projections au delà de 2100 est faible. Les barres colorées présentées à droite de ce graphique concernent l'année 2300 et ont été obtenues à l'aide d'un processus de synthèse de jugements d'experts.



Cette figure est extraite du Résumé pour les décideurs du rapport spécial du GIEC sur les océans et la cryosphère. Dans le résumé du GIEC, la figure correspondante (figure 1) comporte deux graphiques qui ne sont pas reproduits ici, et elle est complétée d'informations techniques : voir ipcc.ch/srocc. Notre version est basée sur l'original en anglais; ce n'est pas une traduction officielle du GIEC.

Impact sur les populations et les services écosystémiques

Observations (passé)

Projections (futur)

Depuis le milieu du 20^e siècle, la réduction de surface de la **cryosphère** dans l'Arctique et les régions de haute montagne a eu des répercussions principalement négatives sur la **sécurité alimentaire, les ressources en eau**, la qualité de l'eau, les moyens de subsistance, la santé et le bien-être, les infrastructures, les transports, le tourisme et les loisirs, ainsi que sur la culture des sociétés humaines, particulièrement chez les peuples autochtones.

Les **communautés côtières** sont exposées à de **multiples dangers** liés au climat, notamment les cyclones tropicaux, les niveaux des mers extrêmes et les inondations, la perte de glace de mer et le dégel du pergélisol. **Diverses réponses ont été mises en œuvre** dans le monde entier, le plus souvent après des événements extrêmes, mais aussi dans certains cas en prévision d'une élévation future du niveau de la mer, par exemple dans le cas de grandes infrastructures.

Les **changements futurs de la cryosphère continentale** vont **affecter les ressources en eau et leur utilisation**, notamment l'agriculture irriguée et l'hydroélectricité dans et en aval des zones de haute montagne, ainsi que les moyens de subsistance dans l'Arctique. On s'attend à ce que des changements dans les **inondations, les avalanches, les glissements de terrain** et la déstabilisation du sol accroissent les risques pour les biens culturels, touristiques et récréatifs.

Les changements futurs dans la **répartition des poissons et la diminution de leur abondance** en raison des changements climatiques auront une incidence sur le revenu, les moyens de subsistance et la sécurité alimentaire des collectivités tributaires des ressources marines. La perte ou la dégradation d'écosystèmes marins aura aussi un impact négatif sur leur valeur culturelle et récréative.

En l'absence d'accroissement des efforts d'adaptation, et en supposant que la tendance à l'augmentation de la vulnérabilité et de l'exposition des populations côtières se poursuive, ces populations seront **soumises à un accroissement significatif des risques** liés à l'érosion des sols, aux inondations, à la salinisation des sols, et à une combinaison de risques liés aux niveaux des mers et aux événements extrêmes, selon tous les scénarios d'émissions. Dans ce cas, les **coûts** annuels des inondations côtières pourraient augmenter d'un facteur 2 à 3 d'ici à 2100.

Les **risques associés à l'élévation du niveau** des mers sont particulièrement élevés dans les atolls (îles coralliennes à très faible altitude) et dans l'Arctique, sauf dans les régions où les terres se soulèvent encore naturellement suite à la fin de la dernière glaciation [le poids de la glace avait abaissé le niveau du sol de ces régions, la remontée du sol limite l'effet de la montée des eaux]. Dans ces régions, les projections indiquent un risque modéré à élevé même avec des émissions de gaz à effet de serre réduites. Dans un scénario où les émissions sont élevées, les risques deviennent élevés dans les régions deltaïques et les grandes villes côtières après 2050, au niveau d'adaptation actuel. On estime cependant qu'une **adaptation** ambitieuse réduirait les risques, bien que les bénéfices qu'on peut en attendre dépendent du contexte.

Réponses aux changements qui affectent les océans et la cryosphère

Potentiel d'action

Défis

Bien que l'adaptation puisse souvent réduire les impacts projetés pour le futur, elle présente aussi des limites. En particulier, les communautés humaines vulnérables, notamment celles qui sont établies au voisinage de récifs coralliens, en haute montagne ou le long des côtes arctiques, seraient soumises à des risques très élevés bien avant la fin de ce siècle dans le cas de scénarios à fortes émissions de gaz à effet de serre, ce qui signifie que des **limites à l'adaptation** pourraient être atteintes. Le risque d'être confronté aux limites de la capacité d'adaptation augmentera et touchera davantage de régions après 2100, parce que le niveau des mers va continuer de s'élever. Des îles pourraient devenir inhabitables, mais les seuils d'habitabilité sont très difficiles à évaluer. Les **populations les plus exposées et vulnérables** sont souvent celles qui ont le moins de moyens à leur disposition pour répondre aux changements.

Réponses

Les écosystèmes océaniques et ceux liés à la cryosphère rendent des services importants à l'humanité. Beaucoup de **mesures** peuvent contribuer à **préserver l'intégrité de ces écosystèmes et de ces services**, notamment la protection ou la restauration des milieux concernés ainsi que la réduction des pollutions et d'autres facteurs de stress. La gestion intégrée de l'eau et l'adaptation fondée sur les écosystèmes réduisent les risques climatiques locaux et procurent de multiples avantages sociétaux. Toutefois, cette adaptation est limitée par des contraintes écologiques, financières, institutionnelles et de gouvernance et, dans de nombreuses situations, l'adaptation basée sur les écosystèmes ne sera efficace que si les niveaux de réchauffement sont les plus faibles.

Les communautés côtières sont confrontées à des **choix difficiles** en ce qui concerne les **réponses à apporter à la hausse du niveau des mers** et aux événements extrêmes, parce qu'il s'agit de trouver un équilibre tenant compte des coûts, bénéfiques, et compromis impliqués par diverses options, et ce en tenant compte de la possibilité d'adapter ultérieurement ces réponses. Différents types de réponses ont un rôle important à jouer, comme la protection des côtes, les systèmes d'alerte inondation, et l'adaptation qui s'appuie sur les écosystèmes (par exemple les zones inondables). L'adaptation basée sur les écosystèmes présente des avantages notamment pour la biodiversité et la qualité de l'eau, mais nécessite que l'espace requis soit disponible. Dans les régions où peu d'espace est disponible, les protections « dures » telles que les digues seront probablement efficaces en terme de coût au cours du 21^e siècle. Cependant, certaines régions peuvent manquer de ressources pour effectuer de tels investissements. Le déménagement d'activités et de populations vaut la peine d'être envisagé pour les communautés de petite taille ou après une catastrophe, lorsqu'il faut reconstruire, mais sa faisabilité est soumise à des contraintes sociales, culturelles, financières, et politiques.

Conditions à réunir pour faire face aux changements

Pour favoriser la résilience aux changements climatiques et le développement durable, il est essentiel de **réduire les émissions d'urgence** et de manière ambitieuse, et d'y associer des **mesures d'adaptation soutenues** et de plus en plus ambitieuses. L'intensification de la coopération et de la coordination entre les autorités gouvernementales à différentes échelles spatiales est un élément clé pour mettre en œuvre des réponses efficaces. **L'éducation** au sujet du climat, l'observation et la prévision, le partage des données et des connaissances, le financement, la prise en compte de la vulnérabilité et de **l'équité** sociales ainsi que le soutien institutionnel sont également essentiels.

► Groenland : quand les vents s'en mêlent

Xavier Fettweis, Chercheur qualifié (FNRS),
Laboratoire de climatologie et topoclimatologie, Université de Liège
Éditeur : Philippe Marbaix

Les projections pour le climat futur sont faites à l'aide de modèles qui représentent les principales composantes du système climatique terrestre (atmosphère, océans, glaces...). En attendant le 6^e rapport d'évaluation du GIEC et les résultats de recherche qui y seront présentés, ces projections sont encore celles du 5^e rapport d'évaluation, publié en 2013. Ces projections indiquent, avec une gamme d'incertitude, les grandes caractéristiques de la répartition géographique du réchauffement, des changements dans les pluies, etc. Mais le climat est le résultat d'interactions complexes à diverses échelles, et leur modélisation présente des limites, en particulier aux échelles régionales. Or le réchauffement global peut être amplifié ou atténué au niveau régional par des changements dans la circulation atmosphérique moyenne (les vents) qui sont, jusqu'à présent, mal simulés par les modèles globaux du climat. Par exemple, il est possible qu'avec une hausse des températures, la fréquence des anticyclones/dépansions et/ou leur position (par exemple : l'anticyclone des Açores) soit modifiée, ce qui entraînerait notamment des changements dans l'origine des vents moyens sur une région donnée.

En Belgique, les vents moyens viennent du sud-ouest, car en moyenne, notre climat est influencé par une dépression centrée sur l'Islande. Ces vents apportent de l'humidité et de la douceur en hiver et une relative fraîcheur en été. Si la position moyenne de l'anticyclone des Açores venait à se déplacer vers le nord, notre climat deviendrait alors plus anticyclonique et continental (c'est à dire moins influencé par les vents venant de l'Atlantique), avec des vents moyens du nord apportant plus de fraîcheur, qui contribueraient au maintien de périodes hivernales froides en dépit du réchauffement climatique [1] mais apporteraient aussi un temps plus ensoleillé, notamment en été [2].

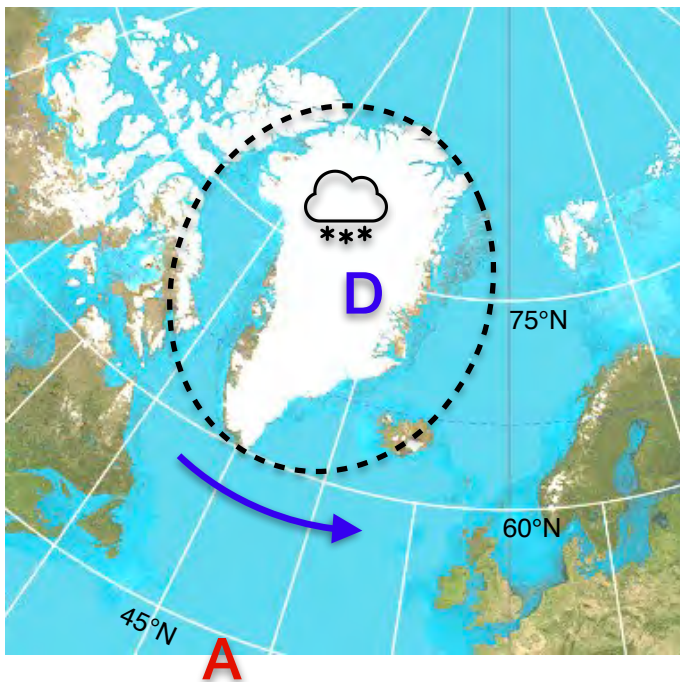
En bref :

- ✓ Des changements de la circulation atmosphérique peuvent contribuer à ce que le réchauffement au niveau régional soit inférieur ou supérieur au réchauffement moyen global.
- ✓ Au Groenland, les situations anticycloniques deviennent plus fréquentes en été, ce qui amène des vents du sud et un temps plus ensoleillé, deux facteurs qui accroissent la fonte en surface.
- ✓ Les conditions anticycloniques diminuent aussi les précipitations neigeuses en été, empêchant ainsi la calotte d'être « protégée du soleil » par de la neige fraîche, plus réfléchissante.
- ✓ Les « points de non retour » où la fonte ne peut plus être stoppée pourraient être atteints beaucoup plus tôt que prévu jusqu'à présent, même si le réchauffement global est limité à +2°C.

[1] Wyard C., Scholzen C., Fettweis X., Van Campenhout J., François L., 2017 : *Decrease in climatic conditions favouring floods in the south-east of Belgium over 1959-2010 using the regional climate model MAR*, International Journal of Climatology, 37(5), 2782-2796.

[2] Wyard C., Doutreloup S., Belleflamme A., Wild M., Fettweis X., 2018 : *Global Radiative Flux and Cloudiness Variability for the Period 1959-2010 in Belgium: A Comparison between Reanalyses and the Regional Climate Model MAR*, Atmosphere, 9, 262.

Groenland : le réchauffement régional plus important au cours des dernières années est principalement lié à un changement de l'apport de chaleur par les vents (circulation atmosphérique)

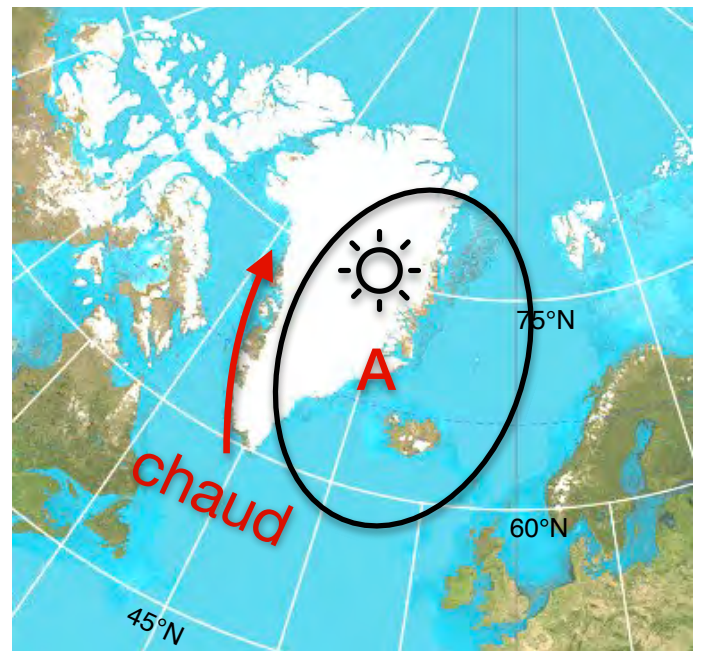


A gauche : circulation atmosphérique moyenne en été, telle qu'au cours de la deuxième moitié du 20^e siècle. Le Groenland se trouve le plus souvent dans une zone de basse pression (D), avec une haute pression plus au sud (A, anticyclone des Açores).

Ces deux figures sont des illustrations schématisées simplifiées. Pour plus d'information, voir Fettweis et al. 2013 : the-cryosphere.net/7/241/2013/tc-7-241-2013.pdf et Belleflamme et al. 2015 : the-cryosphere.net/9/53/2015/

Illustration : Xavier Fettweis et plateforme wallonne pour le GIEC.

Carte : Daniel R. Strebe https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lambert_conformal_conic_projection_SW.jpg.



A droite, exemple de situation anticyclonique qui contribue à un apport de chaleur par les vents. Depuis le début du 21^e siècle, ces situations sont devenues plus fréquentes en été, ce qui contribue à l'accélération de la fonte observée.

Au Groenland, on observe déjà un phénomène de ce type depuis la fin des années 90 : des changements de la circulation atmosphérique sont responsables à eux seuls d'environ 70 % de l'augmentation de la fonte observée de la calotte. Au cours de la période 2006-2015, la contribution du Groenland à la hausse du niveau moyen des mers a représenté environ 1/4 de la hausse totale [3].

Depuis environ 20 ans, les scientifiques ont en effet détecté une augmentation significative des conditions anticycloniques au Groenland en été, apportant de la chaleur (parce que le vent dominant vient alors du sud) et des conditions plus ensoleillées, ce qui fait fondre la calotte comme « neige au soleil » et accélère ainsi la rétroaction positive fonte-albédo [4]. Ces conditions anticycloniques diminuent aussi les précipitations neigeuses en été, empêchant ainsi la calotte d'être « protégée » des rayons solaires par de la neige fraîche, dont l'albédo est élevé.

Une étude récente publiée dans *The Cryosphere* [5] a montré que si de tels changements se répétaient durablement dans le futur, l'accélération de la fonte de la calotte serait même deux fois plus importante que celle prévue par les modèles pris en compte dans les rapports du GIEC jusqu'à présent. Cela suggère que les potentiels « points de non retour » de la calotte, à partir desquels la fonte ne pourrait plus être stoppée, pourraient être atteints beaucoup plus tôt qu'estimé jusqu'à présent, et ce même si le réchauffement global est limité à +2°C (par rapport au niveau pré-industriel). Au cours de l'été 2019, une fonte record a de nouveau été enregistrée au Groenland (elle équivaut à celle de 2012, la plus forte depuis qu'on dispose de données fiables, à partir de 1950) [6]. Comme pour les récents étés où on a enregistré des pics de fonte (ex : 2007, 2008, 2010, 2011, 2012, 2016), un anticyclone est venu se placer sur le Groenland cet été, engendrant la plus forte anomalie anticyclonique (pression de l'air plus élevée que la moyenne historique) constatée sur toute la période pour laquelle on dispose de données (depuis 1850). Même si une telle anomalie anticyclonique n'a pas été observée en 2013, 2017 et 2018, cet été confirme la tendance générale depuis 20 ans, qui suggère que ces changements de circulation, pour l'instant non représentés par les modèles du climat [7], pourraient ne pas être dus à la variabilité naturelle du climat mais être une n-ème rétroaction positive amplifiant les changements en Arctique à la suite du réchauffement global.

[3] La hausse du niveau moyen des mers est due à la dilatation des eaux par la chaleur à laquelle s'ajoute la fonte des glaces continentales (glaciers de montagne et calottes de glace de l'Antarctique et du Groenland). Entre 2006 et 2015, la hausse (totale) est estimée à environ 3 cm.

Source : Rapport du GIEC sur les océans et la cryosphère, chapitre 4.

Voir également l'article relatif au niveau des mers rédigé par Frank Pattyn dans cette Lettre.

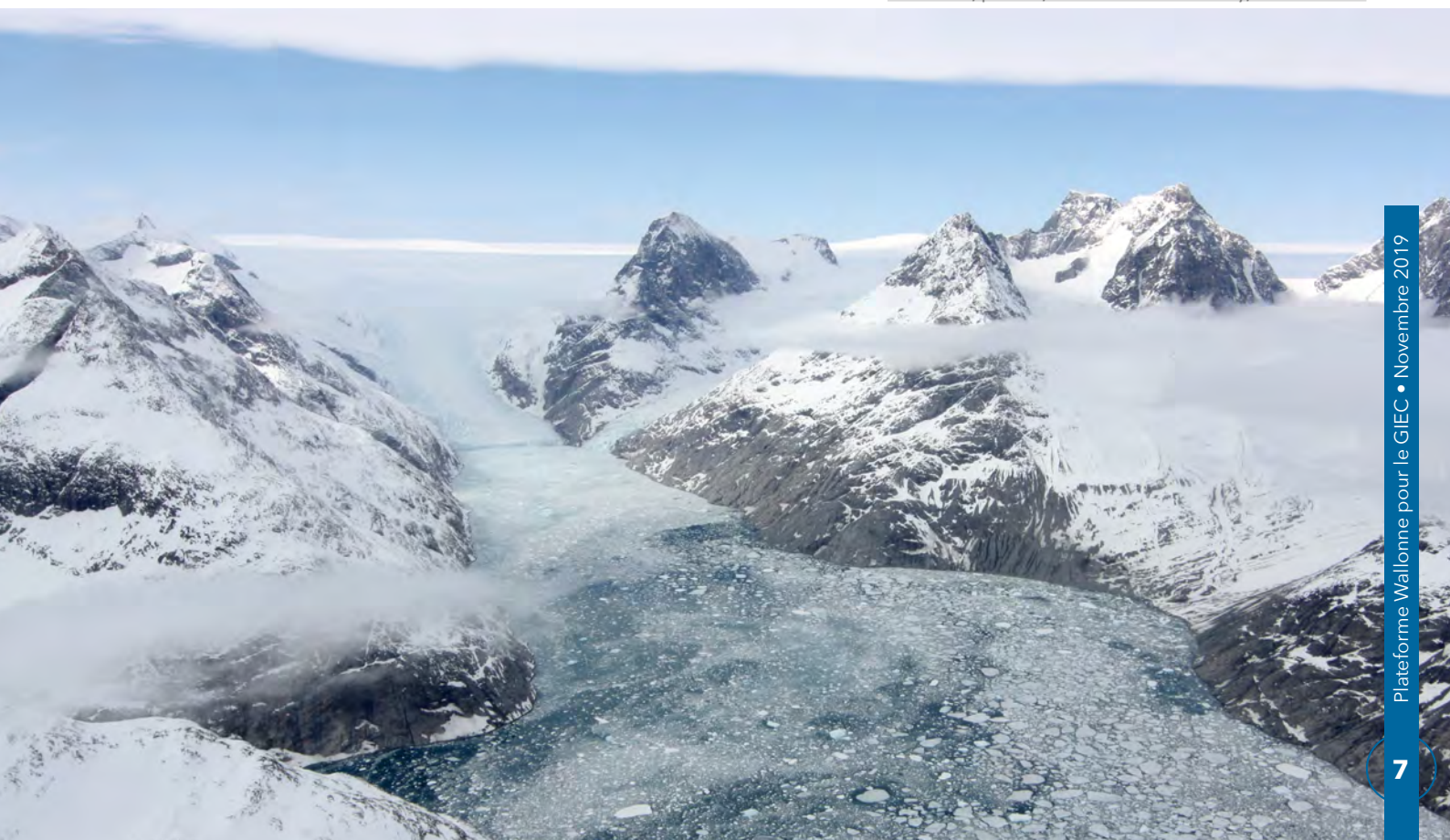
[4] Par « rétroaction positive », on entend qu'il y a amplification du phénomène initial ; dans le cas présent, la fonte de la neige engendre un réchauffement supplémentaire. L'origine de ce phénomène est que la neige fraîche réfléchit fortement les rayons du soleil - on parle d'albédo élevé. Quand la neige fond, elle laisse la place à des surfaces plus sombres (à l'albédo plus faible), comme de la glace. Ces surfaces absorbent davantage de rayonnement solaire et donc se réchauffent plus vite, ce qui contribue à accélérer la fonte de la neige/glace. C'est pourquoi on parle de rétroaction fonte-albédo.

[5] Delhasse A., Fettweis X., Kittel C., Amory C., Agosta C., 2018 : *Brief communication: Impact of the recent atmospheric circulation change in summer on the future surface mass balance of the Greenland Ice Sheet*, *The Cryosphere*, 12, 3409-3418.

[6] Witze A., 2019 : *Dramatic sea-ice melt caps tough Arctic summer*, *Nature*, 573.

[7] Hanna E., Fettweis X., Hall R. J., 2018 : *Brief communication: Recent changes in summer Greenland blocking captured by none of the CMIP5 models*, *The Cryosphere*, 12, 3287-3292.

Ci-dessous : un glacier de l'est du Groenland pénètre dans un long fjord taillé par le mouvement des glaces.
Photo : NASA Earth Observatory, mission IceBridge, Jefferson Beck et Maria-José Viñas
[flickr.com/photos/nasaeearthobservatory/6993002080](https://www.flickr.com/photos/nasaeearthobservatory/6993002080)



► L'Océan est à bout de souffle

Marilaure Grégoire, Directrice de recherches FNRS,
Département d'astrophysique, géophysique et océanographie / MAST (Modelling for Aquatic Systems),
Freshwater and Oceanic sCience Unit of reSearch (FOCUS), Université de Liège
Éditrice : Bruna Gaino

Une perte d'oxygène préoccupante

Le contenu en oxygène dans les océans diminue globalement depuis le milieu du siècle dernier : on parle d'une diminution de 1 à 2 % depuis 1960, ce qui représente une perte d'environ 70 milliards de tonnes d'oxygène. Ce sont surtout les régions du Pacifique, de l'Atlantique Sud et des pôles qui voient leur niveau d'oxygène diminuer fortement.

Cette désoxygénation (diminution de la concentration en oxygène), est particulièrement critique lorsqu'elle affecte des régions qui étaient naturellement pauvres en oxygène et qui s'appauvrissent davantage jusqu'à présenter des concentrations critiques pour la survie de certains organismes, comme les poissons.

Mécanismes de (dés)oxygénation

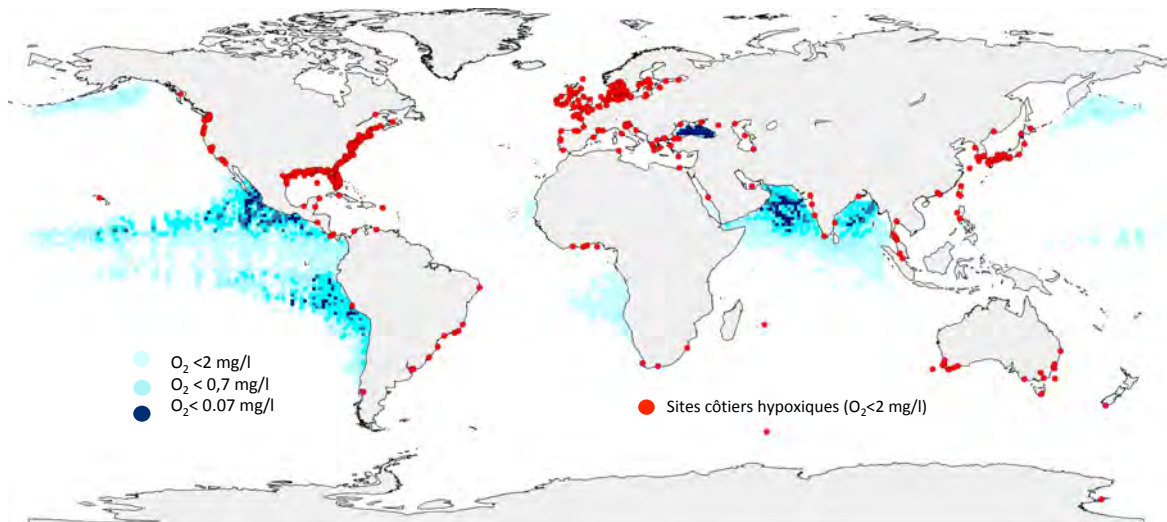
La désoxygénation a lieu dans les régions où l'oxygène est utilisé plus vite qu'il ne peut être remplacé. La dynamique de l'oxygène dans l'océan est gouvernée par des processus physiques et biogéochimiques. L'océan gagne de l'oxygène dans les couches de surface (environ les 100 premiers mètres) par la dissolution de l'oxygène atmosphérique et par la photosynthèse du phytoplancton. Il perd de l'oxygène en surface par le dégazage d'oxygène vers l'atmosphère et, plus en profondeur, par la respiration biologique. La couche de surface océanique est donc bien oxygénée, alors qu'au-delà de la zone bien illuminée, on peut avoir de fortes diminutions de la quantité d'oxygène. Le renouvellement de l'oxygène consommé en profondeur par la respiration dépend de l'existence de mécanismes physiques capables de transférer l'oxygène des couches de surface vers les profondeurs.

Ces mécanismes sont ce que l'on appelle la ventilation des eaux. Les régions du globe où la ventilation est la plus importante sont les régions polaires puisque dans ces régions le refroidissement intense en surface et la formation de glace conduisent à la formation d'eaux plus froides et plus salées, qui en raison de leur poids coulent à plusieurs milliers de mètres de profondeur. Ces eaux denses, bien oxygénées par leur contact avec l'atmosphère, sont transportées par la circulation océanique globale et lors de leur parcours, s'appauvrissent progressivement en oxygène, puisque celui-ci est utilisé pour dégrader la matière organique qui sédimente [descend par gravité] depuis les eaux de surface. Ainsi, à côté des régions polaires bien ventilées, il y a des régions faiblement ventilées, qui sont situées à des profondeurs intermédiaires, entre 100 m et 1000 m, essentiellement dans le Pacifique Est et l'océan Indien. Ces régions, naturellement pauvres en oxygène, sont appelées « zones de minimums d'oxygène » (Figure ci-dessous).

En bref :

- ✓ Depuis 1960, l'oxygène dans les océans a diminué d'environ 70 milliards de tonnes, surtout dans les régions du Pacifique, de l'Atlantique Sud et des pôles.
- ✓ La désoxygénation devient critique quand les concentrations sont trop faibles pour assurer la survie de certains organismes.
- ✓ La désoxygénation est liée à divers facteurs qui peuvent être aggravés par les changements climatiques.
- ✓ Jusqu'à la moitié du siècle dernier, le bilan océanique d'oxygène était à l'équilibre.
- ✓ La perturbation de cet équilibre peut générer des zones anoxiques (privées d'oxygène) dans les océans avec des conséquences sur la biodiversité et les cycles biogéochimiques de certains éléments comme, par exemple, l'azote.

Cartographie des zones de minimums d'oxygène



Cette carte montre les sites côtiers où les nutriments anthropiques ont exacerbé ou provoqué des déclinés d'oxygène (O_2) à des valeurs inférieures à 2 mg / litre (points rouges), ainsi que les zones de minimum d'oxygène de l'océan à 300 m de profondeur (zones colorées en différents niveaux de bleu). Ces phénomènes sont indépendants des changements climatiques qui pourront néanmoins les exacerber.

Source : Breitburg D., Levin L., Oschlies A., Grégoire M. & GO2NE network, 2018 :
Declining oxygen in the global ocean and coastal waters, *Science*, 359 (46).

Ces zones de minimums d'oxygène sont également présentes dans des mers semi-fermées qui ont peu d'échanges avec l'océan ouvert comme la mer Noire et la mer Baltique. Dans les zones côtières et sur les plateaux continentaux faiblement brassés par la marée, la ventilation des eaux de fond est fortement réduite en période de stratification [1], et des zones de minimums d'oxygène peuvent apparaître sur le fond.

Causes de la désoxygénation

Même si le détail des mécanismes impliqués et leur importance relative sont encore débattus, on sait que la désoxygénation des océans s'explique par :

- des changements de la circulation (c.-à-d. des courants marins) avec notamment un ralentissement de la circulation thermohaline [2] globale qui réduit le processus de renouvellement des eaux ;
- une réduction de la solubilité d'oxygène en raison de l'augmentation de la température (i.e. l'oxygène est moins soluble dans une masse d'eau plus chaude) ;
- une réduction de la ventilation des eaux en raison notamment d'un renforcement de la stratification verticale (voir page précédente).

Ces modifications sont liées aux changements climatiques auxquels se superpose la variabilité naturelle du système.

Dans l'océan côtier, c'est l'eutrophisation des eaux [3] qui a conduit à la surconsommation d'oxygène. En effet, l'eutrophisation induit la prolifération de vastes quantités d'algues qui lorsqu'elles meurent coulent au fond. Leur dégradation nécessite une forte consommation d'oxygène, entraînant ainsi un épuisement de l'oxygène sur le fond. Là aussi, on s'attend à ce que le réchauffement climatique aggrave le phénomène de désoxygénation en réduisant la ventilation des eaux de fond.

Impacts sur la biodiversité

L'impact de la désoxygénation sur la biodiversité dans son ensemble est extrêmement difficile à chiffrer à l'échelle de l'océan global. Etant donné que la quantité d'oxygène dans un litre d'eau de mer est environ 35 fois moins importante que celle dans 1 litre d'air, les animaux marins doivent faire preuve d'une efficacité remarquable pour extraire l'oxygène dissout dans l'eau de mer. Certains peuvent s'adapter en réduisant leur métabolisme, en fuyant les zones de minimums d'oxygène ou en adaptant leur morphologie de façon à pouvoir renforcer leur capacité de pompage et de stockage de l'oxygène. Cette adaptation n'est pas possible pour tous les organismes et ne peut se faire que jusqu'à un certain point. De manière générale, les poissons, suivis des crustacés, des échinodermes (e.g. étoiles de

mer) et des mollusques (e.g. moules, huîtres) ont une faible tolérance au manque d'oxygène.

Les zones anoxiques (i.e. sans oxygène) sont dépourvues d'animaux à respiration aérobie mais sont peuplées de microorganismes particulièrement bien adaptés à l'absence d'oxygène qui utilisent d'autres composés (successivement nitrates, oxydes de fer et de manganèse, sulfates, dioxyde de carbone) pour dégrader la matière organique et se développer. Ainsi, la diminution de l'oxygène au-delà d'un certain seuil peut affecter les cycles biogéochimiques de l'azote, du phosphore et du fer. Par exemple, les bactéries dénitrifiantes dégradent la matière organique en transformant d'abord les nitrates en nitrite puis en protoxyde d'azote (N_2O) qui est un gaz à effet de serre, puis en diazote (azote gazeux, N_2). Cette dénitrification a donc deux conséquences importantes, d'une part elle va diminuer la quantité d'azote disponible pour la croissance du phytoplancton et d'autre part, elle peut conduire à la production de protoxyde d'azote, qui est un gaz à effet de serre dont le potentiel de réchauffement est environ 300 fois plus élevé que celui du dioxyde de carbone.

Rétroactions et événements anoxiques océaniques

Il est assez remarquable que jusqu'à la moitié du siècle dernier, le bilan océanique d'oxygène était à l'équilibre. La quantité d'oxygène transportée en profondeur par les mécanismes de ventilation des eaux contrebalançait la quantité nécessaire pour dégrader la matière organique produite dans la couche illuminée de la colonne d'eau par le phytoplancton. Cependant, toute perturbation de cet équilibre pouvant être liée, par exemple, à une augmentation du flux de nutriments venant du fond pourrait altérer cet équilibre. On s'est rendu compte que la désoxygénation mettait en route des processus qui allaient aggraver la désoxygénation (rétroaction positive). Par exemple, le relargage par les sédiments marins de larges quantités de phosphates et de fer lorsque les eaux de fond deviennent pauvres en oxygène va fertiliser les eaux de surface et augmenter la production d'algues favorisant ainsi la désoxygénation. Ce type de processus pourrait accélérer le déséquilibre actuel.

On sait que par le passé, l'océan a souffert de plusieurs événements anoxiques majeurs au cours desquels une partie de la colonne d'eau était dépourvue d'oxygène. Même si la venue d'un tel événement à l'échelle globale n'est pas pour demain, les conditions environnementales actuelles, caractérisées par une combinaison d'une stratification accrue, une réduction de la ventilation et une eutrophisation globale de la zone côtière rappellent les conditions qui, par le passé, sont supposées avoir conduit à l'anoxie des océans avec des conséquences dévastatrices pour la biodiversité.

[1] Stratification : formation ou présence de couches océaniques ayant des propriétés différentes en fonction de la profondeur, telles que la salinité, la densité et la température, et qui agissent comme « barrières » au mélange vertical (voir glossaire du rapport spécial).

[2] Circulation thermohaline : circulation océanique générée par les différences de densité de l'eau de mer.

[3] Eutrophisation des eaux : enrichissement excessif des eaux côtières en nutriments inorganiques comme les nitrates et les phosphates.

► Les glaciers, d'un siècle à l'autre

Rédaction : Philippe Marbaix et Bruna Gaino

La Mer de Glace (massif du Mont-Blanc, France)

1919

2019



Photo : Walter Mittelholzer, ETH-Bibliothek Zürich

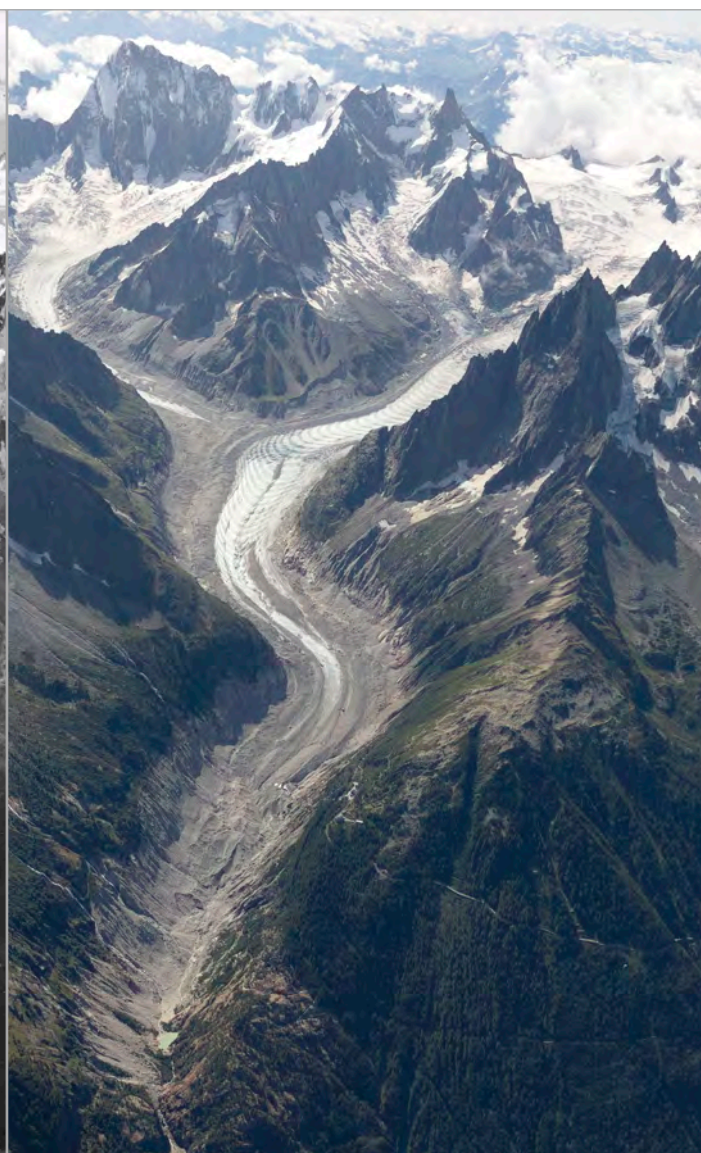


Photo : Dr Kieran Baxter, Université de Dundee

Ces vues aériennes sont le résultat d'une initiative de l'Université de Dundee, en Écosse. La photo de gauche a été prise par le pilote et photographe suisse Walter Mittelholzer en 1919. Un siècle plus tard, Kieran Baxter et Alice Watterson (3DVisLab, Université de Dundee) ont de nouveau survolé le massif du Mont-Blanc pour reproduire trois des photographies de 1919, mettant ainsi en évidence de manière remarquable l'impact du réchauffement sur les glaciers du Mont-Blanc.

Ces photos sont disponibles à l'adresse : uod.box.com/s/qu6n9qq4jdvfvwm0sy4ozeqtxh71etx

Pour plus d'information : dundee.ac.uk/news/2019/new-aerial-photographs-shed-light-on-dark-days-for-mont-blanc.php

Le rapport spécial du GIEC sur les océans et la cryosphère confirme que les observations montrent un déclin général des glaciers, avec des pertes de masse moyenne probablement plus importantes dans la partie sud des Andes, le Caucase et l'Europe centrale (Chapitre 2). La fonte des glaciers et du pergélisol a affecté la stabilité des pentes montagneuses. Les changements qui ont affecté la neige et la glace ont modifié la saisonnalité du ruissellement dans les bassins fluviaux alimentés par la fonte. Dans certaines régions où la quantité d'eau de fonte a diminué, la production agricole a diminué également - surtout en présence d'autres facteurs climatiques ou économiques défavorables (la confiance est encore moyenne en ce qui concerne cet impact). Ces changements vont se poursuivre, de manière plus ou moins longue et importante selon les émissions de gaz à effet de serre futures (voir premier article).

► Niveau des mers : toujours plus haut

Frank Pattyn - professeur ordinaire à la faculté des sciences de l'Université libre de Bruxelles, directeur du Laboratoire de Glaciologie et président du Comité national belge de recherches en Antarctique.
Éditeur : Philippe Marbaix

Le niveau mondial des mers s'élève et continuera de monter encore pendant des siècles, pour toutes les trajectoires de réchauffement globales simulées jusqu'à présent avec les modèles physiques du climat [1]. La hausse du niveau de la mer aura donc certainement des impacts supplémentaires. Cependant, l'ampleur de la hausse est très incertaine.

Dilatation et fonte des glaces

Cette incertitude découle d'un important manque de connaissances sur la vitesse à laquelle le niveau mondial de la mer va s'élever. Au cours du XX^e siècle, le niveau de la mer s'est élevé d'environ 20 cm (en moyenne 2 mm par an). Cette hausse s'est accélérée de sorte qu'elle a atteint plus de 3 mm par an au cours des dernières décennies. Pourquoi cette accélération ?

Au 20^e siècle, c'est la dilatation de l'eau des océans sous l'effet de la chaleur qui a dominé l'élévation du niveau des mers (quand elle se réchauffe, l'eau prend plus de volume, ou autrement dit devient moins dense). Ces changements sont qualifiés de *stériques* (avec changement de volume mais sans changement de masse). C'est d'abord la couche supérieure des océans qui se réchauffe ; cette eau chaude se mélange et se répartit ensuite plus profondément dans l'océan. C'est une évolution à long terme : il faut des siècles pour parvenir à un équilibre des températures océaniques suite à un réchauffement de l'atmosphère.

Au contraire, au 21^e siècle, l'élévation du niveau des mers sera progressivement dominée par les apports d'eau externes, c'est à dire par la fonte des glaciers et des calottes glaciaires groenlandaises et antarctiques, qui augmentent la masse des océans (ces changements sont qualifiés d'*eustatiques*). Ce processus présente un plus grand potentiel de hausse de niveau des mers que la dilatation, car il y a suffisamment de glace pour que la fonte des calottes élève le niveau de 7 m pour le Groenland et 58 m pour l'Antarctique. Au cours des dernières décennies, on a vu les deux inlandsis [2] perdre de la masse à un rythme accéléré.

(cadres jaunes : définitions des termes spécifiques)

[2] **Inlandsis**, aussi appelé **calotte glaciaire** : grande masse de glace qui repose sur un continent qu'elle recouvre largement. Il existe actuellement deux inlandsis : les glaces continentales du Groenland et de l'Antarctique.

En bref :

- ✓ Il y a environ 120 000 ans, le climat terrestre était au plus chaud d'un cycle glaciaire / interglaciaire. Avec seulement quelques degrés de plus, le niveau moyen des mers était de 3 à 9 m supérieur au niveau actuel.
- ✓ L'eau stockée sous forme de glace au Groenland et en Antarctique correspond à 65m de hausse du niveau des mers.
- ✓ Dans l'Antarctique, deux mécanismes par lesquels des parties de calottes de glace pourraient être instables, engendrant une fonte qui s'entretient elle-même, ont été identifiés : l'un concerne la ligne d'ancrage de la glace sur le socle rocheux, l'autre concerne la formation de falaises de glace au bord de la calotte.
- ✓ La contribution future de ces instabilités à la hausse du niveau des mers est encore très incertaine, mais les projections pour le niveau des mers ont été ré-évaluées à la hausse, y compris dans les rapports du GIEC successifs.

[1] Ces modélisations incluent un large éventail de scénarios possibles pour les émissions futures, mais la dernière évaluation complète date du rapport du GIEC publié en 2013. De nouveaux scénarios socio-économiques et d'émissions ont été développés depuis ; l'analyse de leurs conséquences pour le climat est en cours et sera synthétisée dans le prochain rapport du GIEC.

La seule augmentation des températures en surface qui a eu lieu jusqu'à présent implique déjà une poursuite de l'augmentation du niveau des mers suite à l'expansion thermique des eaux. Arrêter l'augmentation du niveau des océans en quelques siècles, si c'est possible, demanderait probablement un très large déploiement des mesures de captage de CO₂ dans l'atmosphère (voir notamment : Michiel Schaeffer et al., 2012. *Long-term sea-level rise implied by 1.5°C and 2°C warming levels*. *Nature Climate Change*).

• Evolution historique du niveau des mers

Le niveau de la mer a toujours changé. Aux échelles millénaires, les variations du niveau de la mer reflètent les changements dans la quantité d'eau stockée sous forme de glace sur les continents, principalement dans de grandes calottes glaciaires. Lorsque le climat s'est refroidi dans le passé (notamment pendant les glaciations du Pléistocène, liées à des facteurs astronomiques [*]), de grandes calottes glaciaires se sont formées sur les continents de l'hémisphère nord. Au plus fort de la dernière glaciation, il y a environ 20 000 ans, l'apport de glace sur les continents a contribué à abaisser le niveau des mers à environ 120 m sous le niveau actuel.

Le niveau de la mer s'est également élevé bien au-delà de son niveau actuel dans le passé. Au cours de la dernière période interglaciaire, il y a environ 120 000 ans, le niveau de la mer était de 3 à 9 m au dessus du niveau actuel. Pendant le Pliocène (il y a environ 3 millions d'années, avant les cycles glaciaires du Pléistocène), ce niveau a atteint 5 à 20 m au dessus du niveau actuel. Pour ces deux périodes, la température atmosphérique moyenne n'était supérieure que de quelques degrés à celle d'aujourd'hui.

[*] Le Pléistocène commence il y a 2,58 millions d'années et se termine il y a environ 11700 ans. Au cours du Pléistocène, des périodes glaciaires ont alterné avec des périodes plus chaudes et plus courtes dites interglaciaires. La fin du Pléistocène correspond au début de l'interglaciaire dans lequel nous sommes actuellement.

Fonte des glaces : des seuils critiques ?

Que nous réserve l'avenir ? Cela dépend. L'accélération de la fonte des glaces peut se produire graduellement, avec pour conséquence une élévation du niveau des mers qui s'accélère aussi progressivement, mais sans que le processus de fonte devienne impossible à arrêter à long terme. Ou au contraire, les calottes glaciaires peuvent atteindre un seuil critique où la perte de masse devient irréversible, avec pour conséquence une augmentation dramatique du niveau des mers au fil des décennies, voire des siècles.

Des « seuils critiques » existent pour les deux calottes glaciaires, mais pour des raisons différentes. Pour la calotte glaciaire du Groenland, le seuil critique est atteint lorsque la quantité de glace qui fond ne peut plus être compensée par la quantité de glace qui est ajoutée par les précipitations (neige). Étant donné que la fonte est fonction de la température et que la température est fonction de l'altitude, une calotte glaciaire de moins en moins haute deviendra également plus chaude, et fondra donc encore plus : le processus de retrait de la calotte glaciaire pourrait ainsi devenir irréversible. Pour la calotte glaciaire antarctique, la situation est un peu plus complexe, avec des interactions avec l'océan et un effondrement possible de la calotte glaciaire : de grandes parties de la calotte pourraient devenir instables, entraînant une élévation rapide du niveau de la mer.

Antarctique : des mécanismes d'instabilité de la glace plus complexes

Les plateformes de glace [3] sont des extensions flottantes de la calotte glaciaire marine [4] (qui repose sur le continent). Elles jouent un rôle crucial dans la stabilité de la calotte glaciaire de l'Antarctique. La plupart des plateformes de glace se trouvent dans des baies où elles exercent une pression contre la glace qui s'écoule vers elles depuis l'intérieur du continent. C'est ce qu'on appelle l'effet « arc-boutant ». Plus prosaïquement, les plateformes de glace peuvent être considérées comme un bouchon de liège sur une bouteille de vin, qui s'assure que le précieux fluide (la glace de l'intérieur du continent dans ce cas)

[3] **Plateforme de glace** (ou **barrière de glace**) : extension flottante de calotte glaciaire qui se crée lorsque la glace devient plus mince et se soulève du socle rocheux parce qu'elle est plus légère et atteint la flottabilité. La plupart des plateformes de glace sont en Antarctique et les deux plus grandes sont les plateformes de glace de Ross et Ronne.

ne puisse pas s'échapper, du moins pas de manière incontrôlée.

La désintégration (partielle) des plateformes de glace flottante entraîne une réduction de l'effet arc-boutant, d'où l'accélération de l'écoulement des glaciers du continent vers la mer. L'importance de ces phénomènes a été observée dans la péninsule Antarctique en 2003 ; la plateforme de glace Larsen B s'est rapidement désintégrée, laissant la baie remplie uniquement de glace de mer [5]. Les glaciers qui alimentaient auparavant la plateforme de glace s'écoulaient maintenant directement dans l'océan. L'effet a été considérable dans les années qui ont suivi : tous les glaciers qui se déversent dans la baie ont vu leur écoulement accéléré d'un facteur de deux ou trois. Cet apport supplémentaire de glace dans l'océan contribue à l'élévation du niveau des mers, alors que la calotte de glace continentale continue de s'amincir (la glace flottante telle que dans les plateformes, ne contribue pas à la montée du niveau de la mer lorsqu'elle fond ; cependant les glaciers continentaux contribuent à la hausse du niveau des mers lorsque de la glace passe la « ligne d'ancrage », c'est à dire la limite entre la glace supportée par le plateau continental et la plateforme de glace flottante).

[5] **Glace de mer** : à ne pas confondre avec les plateformes de glace. Ces deux formes de glaces flottent sur la mer, mais les plateformes sont formées d'eau douce issue des précipitations (neige) alors que la glace de mer se forme par congélation de la couche supérieure de l'océan. L'étendue et l'épaisseur de la glace de mer varient généralement beaucoup d'une saison à l'autre. Elle est également beaucoup plus mince (en mètres) que les plateformes de glace (en centaines de mètres). Étant déjà flottants, ces deux types de glaces ne contribuent pas à la hausse du niveau des mers lorsqu'ils fondent ; seul l'ajout à l'océan de masse d'eau au départ non flottante y contribue (compte non tenu de très faibles effets dus aux différences de salinité entre l'eau de mer et la glace).

[4] **Calotte glaciaire marine** : calotte glaciaire dont le bas se trouve sous le niveau actuel de la mer. En raison de la masse de la glace, cette glace n'est pas à flot : elle continue de reposer sur le continent. Cependant, au bord de la calotte, celle-ci est plus mince et commence à flotter pour former des plateformes de glace (voir figure en page 13).

Ci-dessous : icebergs formés par le glacier de l'île du Pin, Antarctique
Photo : NASA/Kate Ramsayer



Un phénomène similaire est observé dans une autre partie de la calotte glaciaire de l'Ouest Antarctique [6], le secteur de la mer d'Amundsen, mais ici les plateformes de glace ne se désintègrent pas complètement. Le glacier de l'île du Pin (en anglais *Pine Island*), qui se jette dans la mer d'Amundsen, participe au processus. Depuis la fin des années 1990, les eaux profondes chaudes et salées qui circulent normalement autour du continent antarctique à une profondeur de plusieurs kilomètres (également appelées eaux profondes circumpolaires) ont commencé à pénétrer dans la zone (marine) du plateau continental, sous la plateforme glaciaire qui prolonge le glacier de l'île du Pin [7]. Le résultat n'est pas surprenant : l'eau chaude fait directement fondre la plateforme glaciaire, la rendant plus mince, ce qui lui fait perdre le contact avec la baie : l'effet « arc-boutant » diminue et le glacier s'accélère considérablement. Le glacier de l'île du Pin et les glaciers environnants de la calotte de l'Ouest Antarctique sont actuellement responsables de la majeure partie de la perte de masse de la calotte antarctique. Non seulement la perte de masse augmente, mais elle s'étend aussi le long de la côte vers d'autres glaciers qui sont influencés par des mécanismes similaires de perte de masse. Certains auteurs soutiennent que ce recul accéléré des glaces a déclenché une **instabilité des calottes glaciaires marines** [appelée MISI selon l'acronyme anglais, voir encadré ci-contre], qui pourrait entraîner des pertes de masse irréversibles.

- [6] L'Ouest Antarctique (Antarctique occidentale), est la région de l'Antarctique principalement située à l'ouest du méridien de Greenwich (hémisphère Ouest), dans le cadre d'une division de ce continent en deux régions. Elle est plus petite que l'Antarctique de l'Est (voir carte).
- [7] Le plateau continental est une zone océanique qui borde un continent et se caractérise par une profondeur relativement faible et des propriétés communes avec le continent.

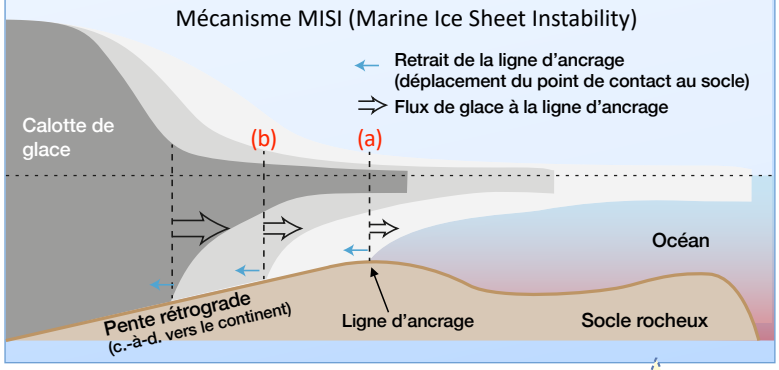
- [9] Une explication plus détaillée figure dans le 5^e rapport d'évaluation du GIEC, groupe de travail I chapitre 13, encadré 13.2 (en anglais).

• Instabilité des calottes glaciaires marines

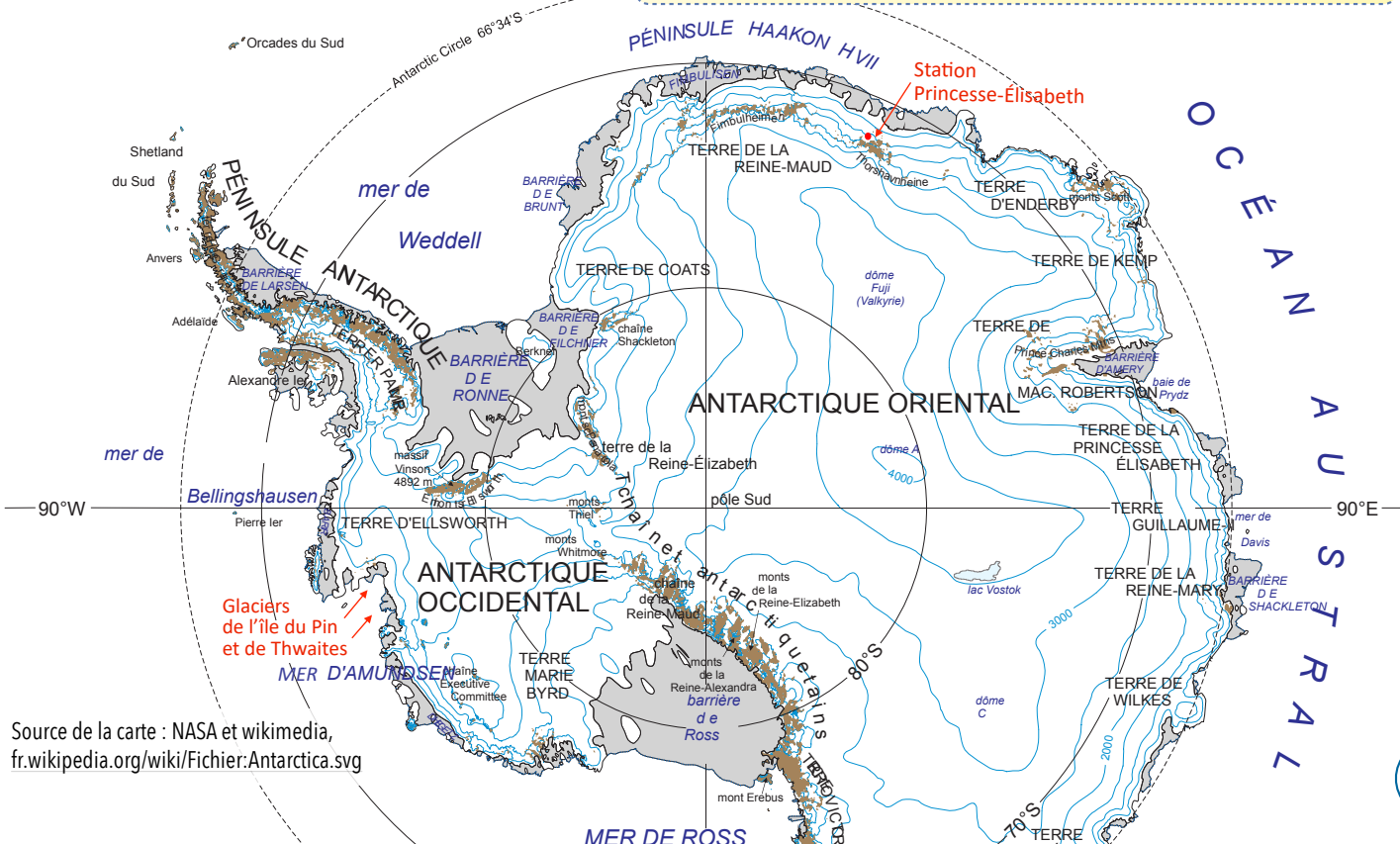
Un point de basculement associé à une perte de masse de glace accrue est l'instabilité des calottes glaciaires marines (en anglais *Marine Ice Sheet Instability*, MISI), illustrée ci-dessous.

L'écoulement de glace augmente généralement lorsque l'épaisseur de la glace à la ligne d'ancrage (limite de contact avec le socle rocheux [8], au centre de la figure) augmente. Dans le cas d'un socle rocheux en pente vers l'intérieur du continent, cela peut entraîner un recul auto-entretenu (une instabilité) de la ligne d'ancrage. Voyons cela plus en détail.

Au départ, le flux de glace vers la mer augmente (par exemple en raison de la diminution de l'effet arc-boutant). Comme la quantité de glace qui vient de l'intérieur de la calotte (et à l'origine, de la neige) n'augmente pas, la glace s'amincit, en particulier près de la ligne d'ancrage (a). Le poids de glace ayant diminué, de la glace qui était posée sur le socle se met à flotter : la ligne d'ancrage recule vers des eaux plus profondes (b). Ce recul implique qu'il y a plus de glace au dessus de la ligne d'ancrage, or l'augmentation d'épaisseur à cet endroit facilite l'écoulement vers la mer, donc le flux de glace augmente encore : cela amincit davantage la glace, ce qui entraîne un recul plus important dans les eaux plus profondes (et dans la glace plus épaisse), et ainsi de suite. Le processus s'arrête lorsque la ligne d'ancrage atteint un socle qui s'incline dans la direction opposée ou lorsque des plateformes de glace peuvent se former pour augmenter suffisamment l'effet arc-boutant [9].



[8] **Ligne d'ancrage** (ou 'échouage') : bord de la zone de contact entre la calotte de glace continentale et la plateforme de glace flottante. Elle définit l'endroit où la glace commence à flotter, et elle peut se déplacer en fonction d'effets dynamiques liés à l'écoulement de la glace.



A quelle hausse du niveau des mers s'attendre ?

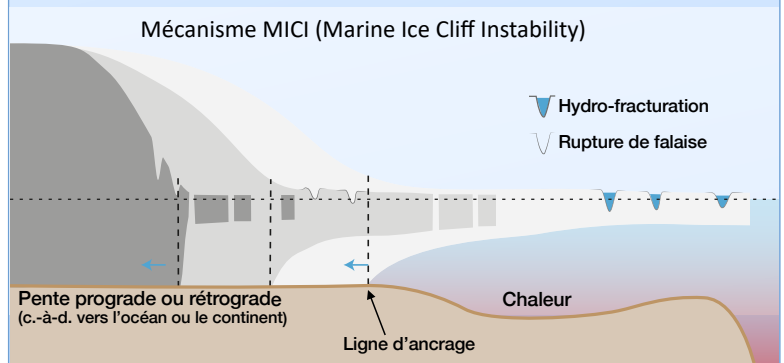
Dans le 5^e Rapport d'évaluation du GIEC, le mécanisme MISI n'était pas incorporé dans les modèles utilisés pour établir les projections futures de la perte de masse de la calotte antarctique, mais les quelques études qui ont suivi n'ont pas modifié de manière significative l'estimation de l'évolution du niveau des mers (Antarctique + autres facteurs, voir figure 2). Cette contribution est substantielle mais estimée à moins d'1 mètre à la fin du siècle (2100) dans un scénario défavorable où l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre se poursuit sans effort de réduction (RCP8.5).

Il y a deux ans, DeConto et Pollard [10] ont fait trembler leur discipline en publiant un article qui soutient que plusieurs glaciers massifs en Antarctique étaient beaucoup plus instables qu'on ne le pensait auparavant. Ces glaciers clés - dont les glaciers Thwaites et de l'île du Pin, dans le secteur de la mer d'Amundsen - pourraient faire monter le niveau mondial de la mer de plus de 1,5 mètre d'ici 2100 (dans le plus mauvais cas ; la valeur moyenne de la contribution de l'Antarctique selon cette étude est illustrée par la courbe jaune sur la figure ci-dessous). L'analyse de DeConto et Pollard était fondée sur la capacité des modèles de calotte glaciaire à simuler les hauteurs de niveau des mers passés du dernier interglaciaire et du Pliocène (voir encadré en page 11). Selon ces auteurs, le MISI à lui seul semble insuffisant pour représenter la contribution de l'inlandsis antarctique à ces paléo-observations. Ils invoquent donc un autre mécanisme, appelé instabilité des falaises de glace marines (encadré ci-contre).

Les futurs scénarios extrêmes du niveau de la mer de DeConto et Pollard n'ont pas seulement ébranlé la communauté des glaciologues. La crainte d'une élévation extrême du niveau de la mer (en ajoutant la fonte du Groenland et l'expansion thermique cela pouvait mener à une hausse de 2,5 m d'ici à 2100) a également secoué la communauté en charge des politiques climatiques. Par exemple, l'Institut néerlandais indépendant de recherche appliquée dans le domaine de l'eau et du sous-sol, DELTARES, a examiné dans une étude récente l'impact d'une hausse de 3 mètres d'ici la fin du siècle, ce qui nécessiterait des mesures d'adaptation majeures pour les Pays-Bas [11].

• Instabilité des falaises de glace marines

L'instabilité des falaises de glace marines (MICI, de l'anglais *Marine Ice Cliff Instability*) est un recul instable et irréversible des falaises de glace en contact direct avec l'océan. Le précurseur de cette instabilité est l'hydrofracturation, c'est-à-dire la désintégration des plateformes de glace due à la percolation des eaux de fonte de surface en combinaison avec la fonte des glaces due aux eaux océaniques plus chaudes, ce qui entraîne un effondrement similaire à celui observé au début des années 2000 sur la plateforme de glace Larsen B. Suite à cet effondrement, la calotte glaciaire entre en contact direct avec l'océan par l'intermédiaire d'une falaise de glace. Les hautes falaises (plus de 90 mètres au-dessus du niveau de la mer), peuvent devenir instables et s'effondrer, ce qui entraîne un recul rapide des falaises au fond des bassins marins. Bien qu'un tel mécanisme d'instabilité des falaises ait été observé pour les glaciers du Groenland et de l'Alaska, il ne l'a pas été pour la calotte glaciaire de l'Antarctique, principalement parce que peu de plateformes de glace se sont effondrées jusqu'ici. De plus, les glaciers de l'Antarctique sont beaucoup plus grands et plus larges, ce qui explique que l'effet potentiel des MICI a des conséquences plus importantes que pour leurs homologues de l'hémisphère Nord.



Source de cette figure et de la figure relative au MISI à la page précédente : adapté de Pattyn et al., 2018. *The Greenland and Antarctic ice sheets under 1.5°C global warming*, *Nature Climate Change* 8, 1053-1061. doi:10.1038/s41558-018-0305-8

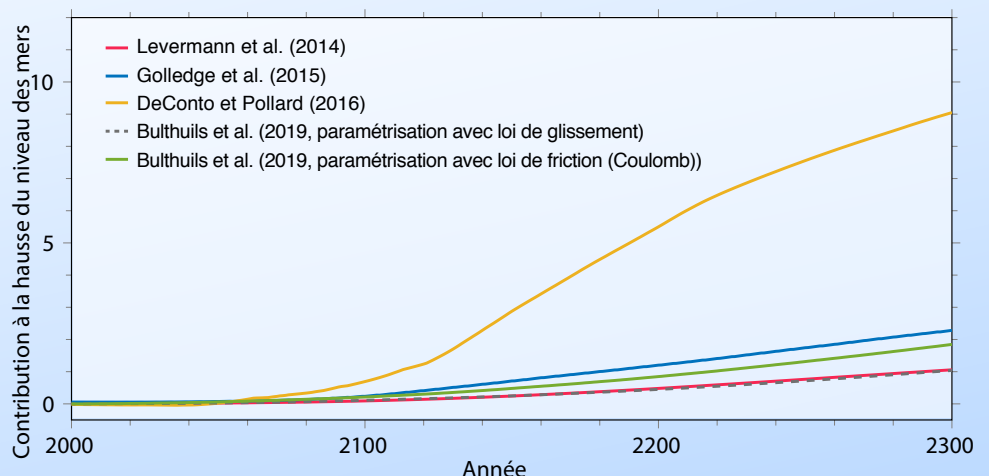
[10] DeConto, R. and D. Pollard, 2016. *Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise*, *Nature* 531: 591-597.

[11] Deltaprogramma 2019, Bijlage B: Rapport Deltares deltacommissaris.nl/documenten/publicaties/2018/09/18/dp2019-b-rapport-deltares

Projections moyennes pour la contribution de l'Antarctique à la hausse globale du niveau des mers

Projections selon un scénario où les émissions de gaz à effet de serre continuent d'augmenter fortement jusqu'à peu près la fin du 21^e siècle (scénario 'RCP 8.5'), d'après différentes études.

Source : adapté de Hanna et al. (2019) *Mass balance of the ice sheets and glaciers – progress since AR5 and challenges*. *Earth Science Reviews*, in press



Néanmoins, une étude publiée récemment dans la revue *Nature* par Edwards et ses coauteurs [12] a réexaminé les simulations du modèle de DeConto et Pollard dans un cadre statistiquement solide, en comparant les simulations avec et sans MICI. Ils constatent que le mécanisme MICI n'est pas nécessaire pour reproduire les changements du niveau de la mer dus à la perte de glace dans l'Antarctique au milieu du Pliocène ou à la dernière période interglaciaire. En excluant le mécanisme MICI, ils constatent que les projections pour le futur concordent avec les études antérieures, ce qui signifie que les interprétations antérieures des projections « avec MICI » surestiment l'élévation du niveau de la mer au cours de ce siècle. Par ailleurs, d'autres mécanismes, liés à la nature glissante du socle et des sédiments de base sous la glace, peuvent accroître la sensibilité de la calotte glaciaire antarctique et entraîner une élévation du niveau de la mer de plusieurs mètres sur des échelles de plusieurs siècles [13].

Perspectives

Ces nouveaux résultats nous mettent-ils dans une meilleure situation? Oui et non. Malgré que les différentes estimations du niveau futur des mers aient été réconciliées, les estimations récentes (y compris celles du Rapport spécial sur l'Océan et la cryosphère) restent supérieures à celles publiés jusqu'au 5^e rapport d'évaluation du GIEC (2013). De plus, on s'attend à ce que d'autres effets non-linéaires apparaissent lorsque les modèles de calotte glaciaire et le couplage de ces modèles avec des modèles atmosphère-océan à haute résolution deviendront plus disponibles et précis. L'observation récente d'une énorme cavité sous-marine sous le glacier Thwaites [14], associée à des taux de recul de la ligne d'ancrage de près de 1 km par an, montre que des changements rapides se produisent actuellement en Antarctique. En termes de niveau de la mer, ce qui se passe en Antarctique ne reste pas en Antarctique.

[12] Edwards, T., et al., 2019. *Revisiting Antarctic ice loss due to marine ice-cliff instability*, *Nature* 566: 58-64.

[13] K. Bulthuis, M. Arnst, S. Sun, F. Pattyn, 2019. *Uncertainty quantification of the multicentennial response of the Antarctic ice sheet to climate change*. *Cryosphere* 13, 1349-1380.

[14] Milillo, P., et al., 2019. *Heterogeneous retreat and ice melt of Thwaites Glacier, West Antarctica*, *Science Advances*, DOI: 10.1126/sciadv.aau3433

Iceberg dans l'océan Austral. Photo : Peter Kimball (Woods Hole Oceanographic Institution, WHOI)



Echéances relatives à une contribution aux travaux du GIEC

Jusqu'au 13 décembre 2019	Contribution du Groupe de travail II au 6^e rapport d'évaluation du GIEC (AR6) : impacts, adaptation et vulnérabilité . Le GIEC invite les experts à participer à la relecture de la première ébauche du texte en préparation. Pour participer à cette relecture, les experts qui ont des compétences à propos d'un des sujets abordés doivent en faire la demande au GIEC. Pour plus d'information, voir ipcc.ch/2019/10/11/wg2-ar6-first-order-draft-expert-review . Accès direct à la demande de participation : ipcc.ch/comments/ar6wg2/fod/register.php . Attention, les demandes de participation doivent parvenir au GIEC une semaine avant la fin de la période de relecture, c'est à dire au plus tard le 6 décembre .
13 janvier - 8 mars 2020	Relecture de la première ébauche de la contribution du Groupe de travail III à l'AR6 : atténuation (réductions d'émissions). Contexte : https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-3/

Prochaines réunion internationales

2-13 décembre 2019 Madrid	25 ^e Conférence des Parties de la Convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (COP 25) : Les deux objectifs principaux de la COP25 sont de finaliser les dispositions de mise en œuvre de l'Accord de Paris par la conclusion d'un accord sur les mécanismes de marché (Article 6 de cet Accord), et de procéder à l'examen du "Warsaw International Mechanism for Loss and Damage", en vue de faire progresser la prise en compte des pertes et préjudices subis par les pays et communautés les plus vulnérables aux impacts des changements climatiques [Pour plus d'information, voir Lettre N°7 (Pertes et Préjudices) et Lettre N°12 (COP 24, article à propos de l'Accord de Paris)]. D'autres thématiques importantes seront largement abordées lors de la COP25, parmi lesquelles le renforcement de l'ambition des plans nationaux (NDCs), les océans, les droits de l'homme, l'équité de genre...
24 février -1 mars 2020 (à confirmer)	52 ^e session plénière GIEC : L'objectif de cette réunion sera vraisemblablement la discussion à propos du contenu du futur Rapport de synthèse du 6 ^e rapport d'évaluation (à confirmer).

Exposition

Dans la prolongation de cette Lettre, nous voudrions vous suggérer la visite de l'exposition Antarctica, proposée par le **Muséum des Sciences naturelles** jusqu'en août 2020. L'exposition présente des films et photos qui font suite au retour sur l'Antarctique du réalisateur français Luc Jacquet, auteur du documentaire primé « La Marche de l'Empereur » (2005).

Pendant 45 jours, une équipe d'artistes a capté, avec du matériel et des techniques dernier cri, l'incroyable diversité du continent blanc, sur terre et sous l'eau. Sous la glace, Laurent Ballesta, plongeur, photographe et biologiste marin, relève un défi à la fois technique et humain en partant à la découverte de profondeurs jusqu'ici inexplorées et d'une biodiversité encore méconnue. Sur la glace, Vincent Munier, photographe de l'extrême, témoigne de la vie animale en Terre Adélie.

L'exposition

L'exposition « Antarctica » est née de cette rencontre entre approches scientifique et esthétique, sur et sous la surface de l'eau. La banquise apparaît comme une porte entre deux mondes : au-dessus, un environnement violent, balayé par les vents et peuplé de quelques rares espèces, et en-dessous, un milieu serein qui regorge de vie. La scénographie atypique, avec des images de qualité sur grand écran, vous plonge au cœur de cet univers, tant sur le plan visuel qu'auditif. Vous découvrez ainsi de manière exclusive ce continent inhospitalier, normalement uniquement accessible aux scientifiques [source : communiqué de presse des organisateurs].

Pour d'autres informations :

bx1.be/news/une-exposition-consacree-a-lantarctique-a-linstitut-royal-des-sciences-naturelles-de-bruxelles/

Adresse : Muséum des Sciences naturelles, Rue Vautier 29 à Bruxelles, www.sciencesnaturelles.be (tout près de la gare de Bruxelles Luxembourg).



Pour télécharger les Lettres précédentes et d'autres informations liées à la Plateforme ou au GIEC : plateforme-wallonne-giec.be
Inscription pour recevoir gratuitement les futures Lettres : lettre@plateforme-wallonne-giec.be avec le sujet « abonnement »

Photo de couverture : Mer de Glace, Chamonix. Prise de vue : Raphaël van Ypersele

Coordination et travail éditorial : Philippe Marbaix et Bruna Gaino.

Conçu et mis en page par la Plateforme wallonne pour le GIEC.

Ce document peut être reproduit, y compris sous forme adaptée, à condition de respecter les droits de reproduction propres aux sources citées dans cette Lettre, quand il y a lieu, et d'indiquer le site plateforme-wallonne-giec.be ainsi que le nom du ou des auteurs du contenu reproduit.

Editeur responsable : Pr. Jean-Pascal van Ypersele, UCLouvain, Place Louis Pasteur 3, bte L4.03.08, B-1348 Louvain-la-Neuve, Belgique.